基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响*

张帆 王爱君 张明

(苏州大学心理学系, 心理与行为科学研究中心, 苏州, 215123)

摘要 采用经典的额外单例范式的变式，通过操纵基于干扰物颜色的统计规则，考察其对注意抑制效应的影响。结果发现：(1)当迫使被试采取特征探测策略时，与无颜色独子的条件相比，被试在所有呈现独子的条件中反应都显著较快；(2)与呈现低概率颜色独子条件相比，呈现高概率颜色独子条件下被试的反应显著较快。研究表明，统计规则对注意的影响不局限于刺激位置，基于干扰物特征的统计规则也会影响注意抑制效应的大小。

关键词 额外单例范式，特征探测策略，统计规则，注意抑制效应

1 引言

每时每刻都有无数信息输入视觉系统，而我们只能从中选择一小部分进行进一步加工。在这个选择的过程中，需要两种注意机制相互协调：增强任务相关信息的加工(即对靶子的加工)和抑制任务无关信息的加工(即对干扰物的抑制)。我们的注意不仅会被主动地分配给任务相关的位置或客体(Folk et al., 1992)，也可能会自动地、无意识地被突显的任务无关刺激吸引(Yantis & Hillstrom, 1994)，抑制任务无关刺激的加工以阻止注意捕获的发生对于提高搜索效率至关重要。

大量研究表明，被试可以有效地抑制对突显的任务无关刺激进行加工，从而提高搜索效率、产生“反应收益”，研究者将之称为“注意抑制效应”(Gaspelin et al., 2015; Gaspelin & Luck, 2018a, 2018b; Gong et al., 2017; Hu et al., 2019; Lee et al., 2018)。如 Gaspelin 等(2015)使用额外单例范式的变式对注意抑制效应进行研究，实验中屏幕上呈现多个不同形状的刺激，要求被试搜索特定形状的靶子，此时靶子在任何维度上都不是单例，这样的设置会迫使被试采取特征探测策略，在一半试次中所有刺激颜色相同，另一半试次中干扰物中会随机有一个刺激颜色与其他所有刺激不同(即颜色独子干扰物，简称颜色独子)。结果发现，当迫使被试采取特征探测策略时，呈现颜色独子不仅不会带来标识注意捕获的反应时损耗发生(即呈现独子条件下被试反应较慢)，反而产生了反应时收益，即呈现颜色独子时被试的反应显著变快。

收稿日期：2020-08-05

* 国家自然科学基金(31871092，31700939)和江苏省基础研究计划(BK20170333)的资助。

通信作者：张　明, E-mail: psyzm@suda.edu.cn; 王爱君, E-mail: ajwang@suda.edu.cn

也有一些研究从电生理(Eimer & Kiss, 2008; Gaspar & McDonald, 2014; Gaspelin & Luck, 2018a; Jannati et al., 2013; Sawaki & Luck, 2010, 2011; Sun et al., 2018)和眼动追踪(Gaspelin et al., 2017; Gaspelin et al., 2019)的角度为这种注意抑制效应提供证据。Jannati 等(2013)采用额外单例范式的变式发现，在反应较快的试次中，突显的颜色独子诱发产生了标识抑制的P_D(positivity contralateral to the distractor)成分，表明在较快反应的试次中被试抑制了颜色独子的加工，或者说由于有效地抑制了突显的颜色独子的加工，被试得以快速做出反应。Gaspelin 等(2017)的实验中使用眼动追踪技术结合额外单例范式发现，与其他非独子干扰物相比，首次扫视更少地朝向突显的颜色独子，表明被试可以抑制扫视指向突显的颜色独子，这种注意抑制效应也可以称为眼动抑制效应。

除了为注意抑制效应的存在提供证据，研究者们也关注这一效应受到哪些因素的影响。Awh 等(2012)提出的优先性地图表明，除了自上而下的目标和自下而上的物理突显性可以影响注意之外，选择历史也是一个很重要的影响因素。选择历史对注意的影响来自于试次历史(Gaspelin et al., 2019)、奖赏(Gong et al., 2016; Gong et al., 2017; 龚梦园 等, 2018)和威胁刺激(Nissens et al., 2017)。除此之外，有研究者提出统计规则(statistical regularity, 即实验任务中隐含的刺激呈现的规律信息)也可以对注意选择产生影响(Failing & Theeuwes, 2019; Ferrante et al., 2018; Wang & Theeuwes, 2018a, 2018b; Zhao & Luo, 2017)。在统计规则与注意的相关研究中，不仅有基于靶子的统计规则(Jiang et al., 2013; Chun & Jiang, 1999; Geng & Behrmann, 2005)，还有基于干扰物的统计规则(Failing et al., 2019; Wang et al., 2019; Wang & Theeuwes, 2018a, 2018b, 2018c)。例如，基于靶子位置的统计规则研究中，Geng 和 Behrmann(2005)采用了视觉搜索任务，其中靶子呈现在某位置的概率是 75%(高概率靶子位置)，呈现在其他位置的概率为 25%(低概率靶子位置)，结果发现当靶子呈现在高概率位置时被试的反应显著较快。同样地，基于干扰物位置的统计规则研究中，Wang 等(2018a)的实验中要求被试搜索特定形状的刺激(菱形中搜索圆形或者圆形中搜索菱形)并忽略一个颜色独子，颜色独子呈现在某一特定位置的比例是 65%(高概率干扰物位置)，呈现在其他位置的概率为 35%(低概率干扰物位置)。结果发现，注意捕获效应在颜色独子呈现在高概率位置时明显减小。此外，不呈现颜色独子的试次中，当靶子呈现在高概率干扰物位置时，对靶子的反应明显变慢。

基于刺激位置的统计规则会影响之后该位置上的刺激判断(Failing et al., 2019; Stilwell et al., 2019; Wang et al., 2019)，而基于刺激特征的统计规则能否影响注意选择尚且存在争议。Maunsell 和 Treue(2006)指出注意不仅会分配给特定位置，也可以被分配给特定特征。许多心理物理学研究和脑成像研究都表明基于特征的注意会影响视野内的行为表现(Sàenz et al.,

2002; Sàenz et al., 2003; Kumada, 2001)。Wang 和 Theeuwes(2018a)在考察基于干扰物位置的统计规则如何影响注意捕获时发现，高概率干扰物位置的干扰物颜色与上一个试次是否重复并不会影响捕获效应，因此他们认为这种统计规则对注意捕获效应的影响纯粹是基于位置的，并不会受到基于特征方面因素的影响。也有其他研究者发现干扰物特征的统计规则在注意搜索中可以影响被试的反应(Vatterott et al., 2017)，他们发现视觉搜索中颜色独子最初会干扰被试反应，但是同样的几个颜色独子连续呈现时其对注意的影响就会降低，直到新的颜色独子呈现反应又会重新受到干扰。也就是说，基于干扰物特征的统计规则是否可以调节注意尚且没有一致的结论。此外，以往研究发现，额外单例范式中当被试采取特征探测策略时，被试可以自上而下地抑制颜色独子的加工以促进搜索，存在显著的注意抑制效应，且这一效应只有当被试掌握关于颜色独子的具体特征时才存在(Gaspelin &Luck, 2018c)。那么，在被试掌握颜色独子具体特征的前提下，操控颜色独子特征的统计规则，颜色独子对注意的捕获能否突破自上而下地抑制也亟待探究。

本研究在以往统计规则研究和注意抑制效应研究的基础上，考察基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响。有研究者指出刺激大小会影响到知觉和注意(Ono & Kawahara, 2007; Pronina et al., 2018; Louisa, 2017)，例如，Louisa(2017)研究结果表明大刺激呈现在小偏心率位置时注意转移潜伏期最长，而以往关于注意抑制效应的研究中，不同形状的刺激大小并没有得到很好的控制(Gaspelin et al., 2015)。因此，本研究分为两个实验，实验 1 采用额外单例范式的变式，在排除刺激大小不同对突显性的影响的情况下考察注意抑制效应，即在 Gaspelin 等(2015)研究的基础上增加了对所有刺激大小的控制；实验 2 则是在实验 1 的基础之上，操控干扰物特征的统计规则，考察其对注意抑制效应的影响，即呈现颜色独子干扰物的试次中有一个干扰物颜色为高概率颜色，其他三个颜色为低概率颜色。如果刺激大小对突显性的影响不大，则预期在控制刺激大小一致的情况下，实验 1 和实验 2 中都能观察到显著的注意抑制效应；如果基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应产生影响，则预期颜色独子为高概率颜色和颜色独子为低概率颜色之间产生的注意抑制效应量有显著差异。

2 实验 1：刺激大小一致时任务无关颜色独子对视觉注意的影响

2.1 方法

2.1.1 被试

基于相关研究中报告的被试数(Gaspelin et al., 2015; Gaspelin & Luck, 2018a)，结合采用

G*Power 3.1.7 对样本数进行计算。采用配对样本 t 检验为实验 1 的统计检验方法，设置参数 effect size dz 为 0.6，I 类错误的概率α error prob 为 0.05，检验效能 Power(1-βerr prob)为 0.8，计算得到的样本量为 24。本实验被试为随机招募的 60 名苏州大学在校学生(19 男，41 女，20.8±2.1 岁)，所有被试视力正常或矫正视力正常，在王克长版《色觉检查图》测试中未表现出色盲或色弱等情况。实验开始之前签署知情同意书并在实验结束之后获得一定报酬。

2.1.2 设备与实验刺激

实验程序使用 Matlab 和 Psychtoolbox 工具包编制，运行于搭载了 Window 7 操作系统的计算机上(独立显卡型号：AMD Radeon(TM) R5 240)。实验刺激呈现在 19 英寸的液晶显示器上(型号：DELL P1914S)，分辨率设为 1024×768，刷新频率设为 75 Hz。整个实验过程中用下巴托将被试头部固定在距离显示器 65 cm 的位置，并使用键盘(型号：Dell KB212-B)进行反应。

搜索序列呈现时，靶子和五个干扰物均匀地分布在以灰色注视点为圆心的虚拟的圆上(半径:4.5°，相邻刺激与注视点连线之间的夹角为 60 度)，每个刺激中都有一个随机向左或向右偏转 45°的黑色线段(0.3°×0.05°)，实验中要求被试对靶子中线段的偏转方向进行判断。对于所有被试来说，靶子随机为菱形或圆形，在整个实验中保持不变(菱形：1.13°×1.13°或圆形：直径 0.9°)，干扰物可能为与靶子不同的三种形状，且搜索序列中每个形状不得出现超过 2 个，例如，靶子为菱形时，其他干扰物可能为圆形、正方形(0.8°×0.8°)和正六边形(边长：0.5°)；靶子为圆形时，其他干扰物可能为菱形、正方形和正六边形。所有被试中，有一半被试靶子为红色(RGB:[171 0 0]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.67，y = 0.32)，颜色独子绿色(RGB:[0 98 0]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.34，y = 0.59)，另一半被试靶子为绿色，颜色独子为红色。整个实验中，搜索序列都呈现在黑色背景上，所有刺激内线段为黑色，刺激颜色可能是红色(RGB:[171 0 0])或绿色(RGB:[0 98 0])。

以往研究中对于刺激大小的控制并不严格，如 Gaspelin 等(2015)中使用的菱形为 1.6° × 1.6°，圆形直径为 1.4°，以本研究使用的显示器为例换算菱形和圆形的面积会发现被试知觉到的圆形(2.08 cm^2)明显要大于菱形(1.73 cm^2)，而 Wang 和 Theeuwes(2018c)中使用的圆形(1.06 cm^2)则明显小于菱形(2.71 cm^2)。实验 1 考虑到刺激大小不同可能会自下而上地影响被试的反应速度，匹配实验中使用的颜色亮度的基础上使所有刺激大小均保持一致(约 0.86 cm^2)，并在此基础上考察注意抑制效应。

2.1.3 实验设计和实验流程

参考以往相关研究(Gaspelin et al., 2017; Gaspelin & Luck, 2018a)，本实验为单因素被试内设计(是否呈现颜色独子：呈现 vs. 不呈现)，即对于每个被试来说，一半试次中靶子和其他五个非靶子干扰物颜色相同，另一半试次中会有一个颜色独子随机呈现在某一非靶子位置。具体实验流程如图 1 所示，首先呈现 500 ms 空屏，之后在屏幕中央呈现灰色注视点，目的是将被试注意集中到屏幕中央，500 ms 之后注视点消失并呈现搜索序列，要求被试既快又准地对靶子中央线段朝向进行按键判断(向左偏按左箭头，向右偏按右箭头)，按键之后搜索序列消失，如果被试反应错误或者反应时超过 3000 ms 则给予反馈。

每个被试在正式实验开始之前练习 30 个试次，目的是让被试熟悉实验任务和实验中呈现的不同形状的刺激。正式实验中呈现颜色独子和不呈现颜色独子两个条件下各 240 个试次(共包含 8 个 block，每个 block 60 个试次)。

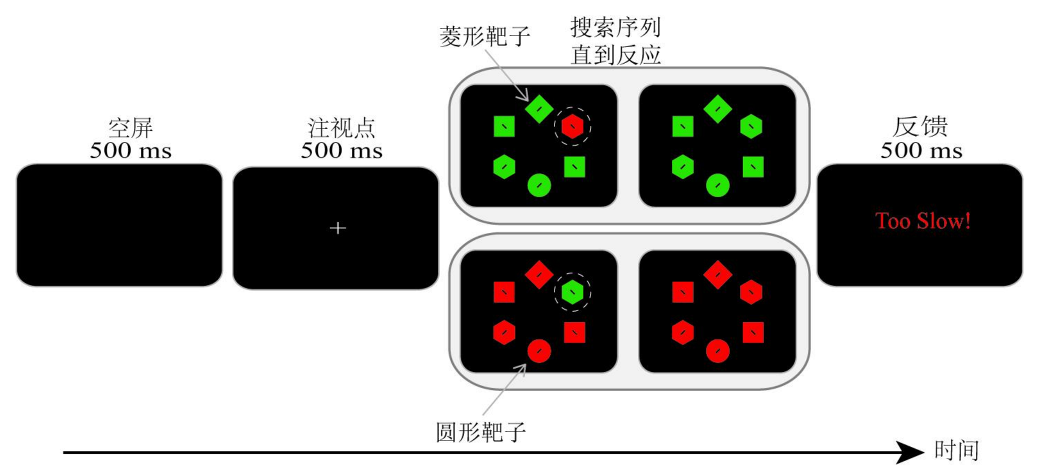


图 1 实验 1 流程图 正式实验中，要求被试搜索特定形状的靶子(菱形或圆形)，并既快又准地对其内部的线段朝向做出判断。搜索序列呈现时，一半试次中所有刺激颜色一致(即无颜色独子呈现)，另一半试次中有一个颜色独子呈现(虚线圆圈标识，彩图见电子版)。

2.2 结果和分析

剔除反应时大于 2000 ms 或小于 500 ms 的试次(2.32%)及错误试次(1.39%)，对每个被试剩余有效试次的平均反应时进行配对样本 t 检验(是否呈现颜色独子：呈现 vs. 不呈现)。结果如图 2A 所示，呈现独子条件下被试的反应(947.40 ms)显著快于不呈现独子条件下被试的反应(963.85 ms)，$t(59) = -5.75$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 0.74$，95% CI = [-22.18, -10.72]。这一结果表明，颜色独子呈现时不仅没有捕获注意导致反应损耗，反而带来了反应收益，出现了注意抑制效应。对是否呈现颜色独子两种条件下错误率的分析显示，呈现颜色独子时(0.75%)和不呈现颜色独子时(0.75%)被试出错的比例没有显著差异，$t<1$。

为了考察被试的认知控制能力随着时间进程如何变化，参考前人研究的的分析方法(Gaspelin & Luck, 2017; Vatterott & Vecera, 2012)，我们将所有试次分组，对前 1/4 试次和后 1/4 试次的平均反应时进行 2(时间：前 1/4 vs. 后 1/4)×2(是否呈现颜色独子：呈现 vs. 不呈现)重复测量方差分析，结果发现时间主效应显著，$F(1,59) = 41.61, p < 0.001, \eta^2 = 0.41$，是否呈现颜色独子主效应显著 $F(1,59) = 11.70, p = 0.001, \eta^2 = 0.165$，两者的交互作用也显著 $F(1,59) = 5.62, p = 0.021, \eta^2 = 0.087$。为了进一步了解时间和是否呈现颜色独子之间的交互关系，对不同时间条件下的反应时结果进行简单效应分析，结果发现，前 1/4 试次中，呈现颜色独子(994.98 ms)和不呈现颜色独子(1000.95 ms)两个条件下被试的反应差异不显著，$F(1,59) = 1.16, p = 0.286$，而后 1/4 试次中，呈现颜色独子(917.98 ms)和不呈现颜色独子(942.73ms)两个条件下被试的反应差异显著，$F(1,59) = 14.92$，$p < 0.001$。也就是说，被试在刚开始做前 1/4 试次中尚且不能良好的抑制颜色独子的加工，而随着任务的进行被试逐渐能够无意识地对颜色独子产生抑制，从而提高搜索效率。此外，对前 1/4 试次和后 1/4 试次中的注意抑制效应量($RT_{不呈现}$-$RT_{呈现}$)进行配对样本 t 检验，结果发现前 1/4 试次的注意抑制效应量显著小于后 1/4 试次，$t(59) = -2.37$，$p = 0.021$，Cohen's $d = -0.31$，95% CI = [-34.64, 2.94], 这也在一定程度上表明注意抑制效应可能是一个内隐的规则学习的过程。

在这个实验中，颜色独子的颜色特征固定，如果颜色独子的颜色特征为多个颜色以一定统计规则呈现，被试还能否抑制对颜色独子的加工，进而产生注意抑制效应尚未探明。为了考察基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响，在实验 2 中操控了颜色独子特征的统计规则，在呈现颜色独子的试次中，独子的颜色分为高概率颜色和低概率颜色。

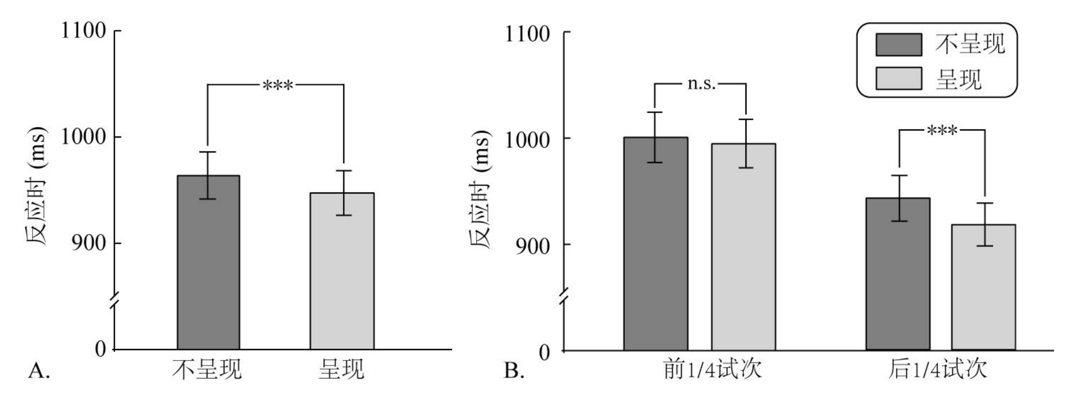


图 2 实验 1 中不同独子呈现条件下的平均反应时结果 图 A 为实验 1 总的反应时结果，图 B 为前 1/4 试次和后 1/4 试次中不同独子呈现条件下的反应时结果。
注：***$p < 0.001$，n.s. $p > 0.05$

3 实验 2：基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响

3.1 方法

3.1.1 被试

基于相关研究中报告的被试数(Wang et al., 2019)，结合采用 G*Power 3.1.7 对样本数进行计算。采用重复测量方差分析为实验 2 的统计检验方法，设置参数 effect size f 为 0.25，I 类错误的概率α error prob 为 0.05，检验效能 Power(1-βerr prob)为 0.8，计算得到的样本量为 28。本实验被试与实验 1 相同，为随机招募的 60 名苏州大学在校学生(19 男，41 女，20.8±2.1 岁)。实验开始之前签署知情同意书并在实验结束之后获得一定报酬。

3.1.2 设备与实验刺激

实验设备和实验流程同实验 1。与实验 1 不同的是，实验 2 中颜色独子呈现时可能为 4 种颜色，即靶子为红色(RGB:[171 0 0]，15.8 cd/m^2，x = 0.67，y = 0.32)时，颜色独子可能为绿色(RGB:[0 98 0]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.34，y = 0.59)、黄色(RGB:[89 89 0]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.44，y = 0.50)、蓝色(RGB:[0 0 255]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.16，y = 0.05)和紫色(RGB:[148 0 148]，15.8 cd/m^2，CIE 色度图位置:x = 0.31，y = 0.14)；靶子为绿色时，颜色独子可能为红色、黄色、蓝色和紫色。

3.1.3 实验设计和实验流程

基于以往相关研究(Wang et al., 2019; Wang & Theeuwes, 2018b, 2018c)，本实验为单因素被试内设计(颜色独子类型：不呈现 vs. 低概率颜色 vs. 高概率颜色)。实验开始之后，1/3 试次中不呈现颜色独子，另外 2/3 试次中颜色独子会随机呈现在与靶子不同的位置上。呈现颜色独子的试次中，50%的试次独子为一种颜色(即高概率颜色，占总试次的 1/3)，另 50%的试次为其他三种颜色，共占总试次的 1/3 (即低概率颜色，各自占总试次的 1/9)，且高概率颜色在被试间随机。要求被试既快又准地对靶子中央线段朝向进行按键判断(向左偏按左箭头，向右偏按右箭头)。

每个被试在正式实验开始之前练习 30 个试次，目的是让被试熟悉实验任务和实验中呈现的不同刺激颜色。正式实验中不呈现颜色独子条件下 120 个试次，呈现颜色独子条件下 240 个试次，其中 120 个试次为高概率颜色独子，120 个试次为低概率颜色独子(共 6 个 block，每个 block 60 个试次)。

3.2 结果和分析

为了考察反应时在不同颜色独子类型条件中的效应，首先剔除反应时大于 2000 ms 或小于 500 ms 的试次(4.44%)及错误试次(1.91%)，之后对每个被试剩余有效试次的平均反应时进行重复测量方差分析(颜色独子类型：不呈现 vs. 低概率颜色 vs. 高概率颜色)，$F(2,118) = 13.91$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.19$，结果如图 3 所示。进一步对三种颜色独子类型条件下的平均反应时进行两两配对的 t 检验，结果发现，无独子条件下被试的反应(1033.61 ms)显著慢于低概率颜色独子条件下被试的反应(1022.98 ms), $t(59) = 2.54$, $p = 0.014$, Cohen's $d = 0.33$，95% CI = [2.24, 19.03];无独子条件下被试的反应(1033.61 ms)显著慢于高概率颜色独子条件下被试的反应(1010.69 ms)，$t(59) = 5.39$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.70$，95% CI = [14.41, 31.44]。这两个结果表明呈现颜色独子时出现了注意抑制效应，即被试可以抑制颜色独子的加工从而带来反应时收益。此外，结果发现高概率颜色独子呈现时被试对靶子的反应(1010.69 ms)显著快于低概率颜色独子呈现的条件(1022.98 ms)，$t(59) = 2.68$, $p = 0.010$, Cohen's $d = 0.35$，95%CI = [3.11, 21.48]这个结果说明基于干扰物特征的统计规则可以影响注意抑制效应，即相较于低概率颜色特征来说，被试能够更好地抑制高概率颜色特征的加工。对三个条件下错误的试次个数进行重复测量方差分析显示差异不显著，$F(2,118) = 1.04$, $p = 0.356$。

与实验 1 相同，为了考察基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响随着时间进程如何变化，我们参考以往研究的分析方法(Gaspelin & Luck, 2018a; Vatterott & Vecera, 2012)，将所有试次分组，对前 1/4 试次和后 1/4 试次的平均反应时进行 2(时间：前 1/4 vs. 后 1/4) ×3(颜色独子类型：不呈现 vs. 低概率颜色 vs. 高概率颜色)重复测量方差分析。结果发现，时间主效应显著，随着任务进行被试的反应显著增快，$F(1,59) = 11.17$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.159$，颜色独子类型主效应显著，$F(2,118) = 13.64$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.188$，两者的交互作用不显著 $F(2,118) = 0.68$, $p = 0.507$, $\eta^2 = 0.011$。但由于本实验更关心不同时间条件下的颜色独子类型效应，故做了进一步的事后比较，结果发现，前 1/4 试次中，无独子条件下被试的反应(1062.16 ms)与低概率颜色独子条件下被试的反应(1053.38 ms)差异不显著，$t(59) = 0.99$, $p = 0.340$。然而，无独子条件下被试的反应时(1062.16 ms)却显著大于高概率颜色独子条件下被试的反应(1037.42 ms)，$t(59) = 2.79$, $p = 0.007$, Cohen's $d = 0.36$，95% CI = [7.00, 42.50]。而后 1/4 试次中，无独子条件下被试的反应时(1027.82 ms)显著大于低概率颜色独子条件下被试的反应(1010.72 ms)，$t(59) = 2.07$, $p = 0.043$，Cohen's $d = 0.27$，95% CI = [0.56, 33.63]，同时，无独子条件下被试的反应时(1027.82 ms)也显著大于高概率颜色独子条件下被试的反应(988.23

ms)，$t(59) = 4.29$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.55$，95% CI = [21.10, 58.08]。与前 1/4 试次不同的是，在后 1/4 试次中，高概率颜色独子条件下被试的反应(988.23 ms)显著快于低概率颜色独子条件(1010.72 ms)，$t(59) = 3.02$, $p = 0.004$, Cohen's $d = 0.39$，95% CI = [7.59, 37.40]。这些结果表明，不同颜色独子特征条件下的注意抑制效应是不同的，且随着任务的进行不同特征条件下注意抑制效应都是被促进的，此外，被试可以更快地习得对高概率特征的抑制，对低概率特征的抑制习得的较慢。

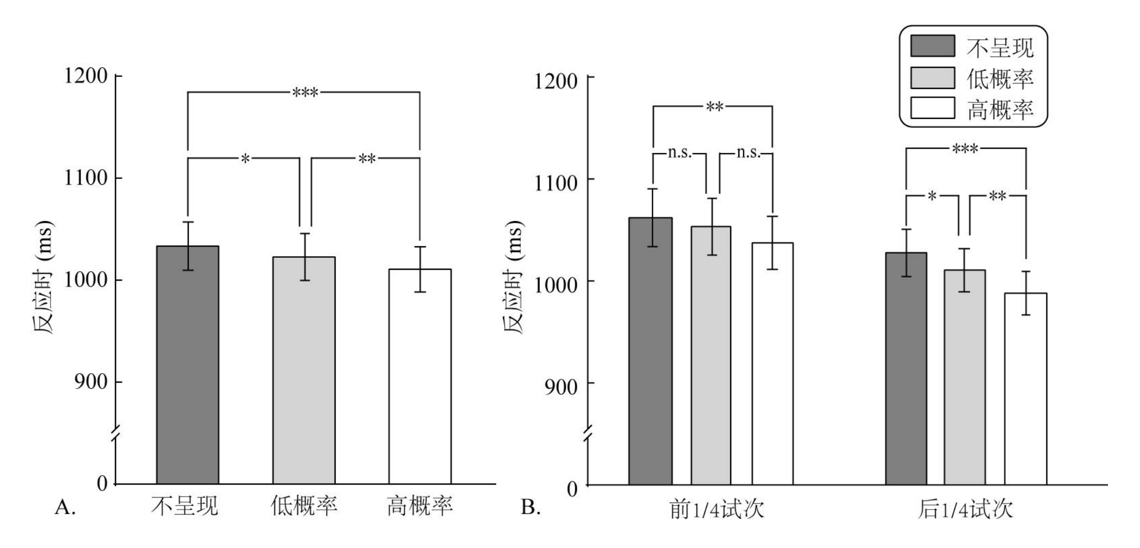


图 3 实验 2 中不同独子呈现条件下的反应时 图 A 为实验 2 总的反应时结果，图 B 为前 1/4 试次和后 1/4 试次中不同独子呈现条件下的反应时结果。

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$，n.s. $p>0.05$

4 讨论

本研究采用经典的额外单例范式的变式，通过操控颜色独子干扰物特征的统计规则，考察其对注意抑制效应的影响。实验 1 中，排除刺激大小对实验任务的影响之后，结果依然发现，与不呈现独子干扰物的条件相比，独子干扰物呈现时被试的反应时显著更短，即出现了抑制干扰物带来的反应时收益，产生了显著的注意抑制效应，且进一步分析发现这一效应会随着任务的进行会逐渐的产生和增大。排除刺激大小带来干扰是由于以往研究中刺激大小不同对于实验结果有一定的影响(Wang & Theeuwes, 2018b)。例如，Wang 和 Theeuwes(2018b)实验 1 要求被试在不同形状的 2°视角刺激中搜索 1°视角的圆形，结果发现原本应该被抑制的干扰物反而会捕获注意。在实验 1 的基础上，实验 2 中加入对颜色独子干扰物统计特征的操控，来考察其对注意抑制效应的影响。结果发现，与实验 1 的结果一致，呈现颜色独子时，无论颜色独子为低概率颜色还是高概率颜色，被试的反应都显著快于未呈现颜色独子的条件。

此外，与低概率颜色条件相比，颜色独子为高概率颜色时，被试能够更好地抑制对颜色独子干扰物的加工，产生更大的注意抑制效应，这也表明独子干扰物特征的统计规则会对注意抑制效应产生影响。前后试次对比发现，被试能迅速抑制对高概率颜色独子的加工，而对低概率颜色独子的抑制是随着任务进行逐渐产生的。

以往研究发现，基于干扰物位置的统计规则可以影响视觉注意(Failing et al., 2019; Wang & Theeuwes, 2018a; Wang et al., 2019)。基于空间位置的研究一直是注意研究领域重要的组成部分，但注意不仅会被分配给特定的位置，还会被分配给特定的特征(Maunsell & Treue, 2006)。本研究的结果发现，基于干扰物特征的统计规则同样可以影响视觉注意。以往关于干扰物位置的统计规则影响视觉注意的研究显示，独子干扰物呈现在高概率位置时，相对于其他干扰物位置受到了抑制(Failing et al., 2019; Wang & Theeuwes, 2018a, 2018b, 2018c)。表面上看本研究和以往基于干扰物位置的统计规则的相关研究结果相似，均为高概率位置或特征受到更多的抑制，但其实并不相同。以往关于干扰物位置的统计规则影响视觉注意的研究采用的大多采用的是经典的额外单例范式(Failing et al., 2019; Wang et al., 2019)，实验中靶子在形状维度上为独子，被试根据任务会采用独子探测策略，即搜索呈现的刺激中与其他刺激不同的那个，此时颜色独子作为颜色维度上的独子会自动捕获注意，产生由呈现颜色独子带来的反应时损耗标识的注意捕获效应。也就是说，当颜色独子呈现在高概率位置时受到“抑制”本质上指的是，当颜色独子呈现在高概率位置时，相较于呈现在低概率位置，注意捕获效应减小。而实验 2 中采用的是额外单例范式的变式，任务中引入了多个不同形状的刺激，靶子不再是形状维度的独子，迫使被试采取特征探测策略，此时颜色独子会受到自上而下的抑制，产生由呈现颜色独子带来的反应时收益标识的注意抑制效应，此时高概率颜色独子受到抑制其实指的是注意抑制效应增大。

有研究者认为基于特征的注意在搜索具有该特征的刺激时起着重要的作用，视觉搜索任务中可以通过基于特征的注意来增强对靶子相关信息的响应，当被试选择一个特征进行加工时，许多皮层区域的体素对该特征的响应都高于其他特征(Gong & Liu, 2020; Maunsell & Treue, 2006)，而本研究在一定程度上表明基于特征的注意在抑制干扰物加工方面也起着重要作用。本研究中被试之所以能够同时抑制多种颜色特征，有一种可能是与被试的工作记忆容量有关。有研究者认为工作记忆容量和基于特征的注意有关，维持基于某种特征的注意可能涉及与视觉工作记忆相同的神经资源(Sawaki et al., 2012; Sawaki & Luck, 2013)，对于满足工作记忆容量的特征数，基于特征的注意可以影响其加工过程。实验 2 中高概率颜色和低概率颜色一共有四种不同的颜色，实验中告知被试颜色独子由可能为哪些不同的颜色，当工作

记忆容量可以满足这些信息的加工时，被试则能够抑制特定特征的刺激。但也并不是所有研究都支持这一点，也有研究者认为工作记忆容量和基于特征的注意无关(Burnham et al., 2011; Fukuda & Vogel, 2011; Harris et al., 2020)，例如Harris等(2020)使用三个独立的工作记忆任务，发现工作记忆容量的个体差异和对干扰物加工时基于特征的偏差量的个体差异之间并不相关。也就是说，关于工作记忆和基于特征的注意之间的关系尚且存在争议，如果要考察工作记忆容量是否与基于特征的注意对注意抑制效应的影响有关，未来还需要更多的研究来进行探讨。

有研究者采用与本研究实验 2 类似的额外单例范式的变式，通过操控颜色独子呈现的位置发现，颜色独子呈现在低概率位置时被试的反应慢于无独子条件，表明颜色独子并没有受到抑制反而可以捕获注意(Wang & Theeuwes, 2018c)，这一点与本研究实验 2 不同。造成这一差异的原因可以归结为两方面：第一，本研究实验 2 中颜色独子共有 4 种颜色特征，而 Wang 和 Theeuwes(2018c)的研究中关于颜色独子的统计规则是基于位置的，且在他们的实验中颜色独子可能出现是位置有 8 个，被试分配到每个位置的注意资源并不足以对高概率位置产生更大的抑制；第二，本研究实验 2 中各个刺激的大小一致，要求被试采取严格的特征探测策略，而在 Wang 和 Theeuwes(2018c)的研究中，圆形(1°视角)混在七个棱角刺激中(2°)，被试有可能并没有采用严格的特征探测策略。此外，本研究实验 2 中低概率颜色条件下注意抑制效应的削弱也有可能是偶然呈现的低概率特征带来的自下而上的影响，即自下而上带来的捕获和对颜色独子的抑制产生抵消导致注意抑制效应减小了。Gaspelin 和 Luck(2018c)在对注意抑制效应的机制进行探索的时候发现，只有当被试提前掌握有关即将呈现的颜色独子的具体特征(他们称之为“一阶特征”)时，被试才能够抑制对其的加工，即告知被试“抑制红色干扰物”时被试能够抑制颜色独子的加工产生注意抑制效应，而告知被试“抑制一个其他颜色刺激”时则不能产生抑制效应，他们称之为“一阶特征模型”。这种说法可以解释本研究的结果，即被试在实验之前掌握所有即将呈现的颜色独子的具体特征，就可以对其产生抑制。而本研究的结果对该模型的补充在于，先前实验中独子干扰物的颜色特征单一且在整个任务中保持不变，而本研究中独子干扰物的颜色特征有四个且在整个任务中随机出现，这也表明注意抑制能力非常强的且足够灵活。但还有一种可能是，被试掌握关于靶子的一阶特征时，会自动抑制其他与靶子一阶特征不符的其他颜色独子，与颜色独子的特征信息和特征数目无关。本研究和前人研究中对于每个被试来说靶子颜色都是单一的，并不能对这种可能性进行排除，未来需要更多的研究继续探究注意抑制效应的机制。

实验 1 前后试次对比发现注意抑制效应逐渐增大，实验 2 前后试次对比发现低概率颜色

独子带来的注意抑制效应逐渐增大且高低概率颜色独子条件之间的注意抑制效应量差异逐渐增大，这些结果表明这种注意抑制效应随着任务进行是不断变化的，这与前人研究结果一致(Gaspelin & Luck, 2018c; Vatterott & Vecera, 2012)。产生这一结果的原因可能是这种基于自上而下信息的认知控制需要足够的时间来完全建立(Han & Kim, 2009)。例如，Gaspelin 和 Luck(2018c)使用额外单例范式考察注意抑制效应时，将试次分为 4 部分，任务刚开始的 1/4 试次中并没有注意抑制效应，而在最后的 1/4 试次中被试就可以很好的抑制颜色独子，产生显著的注意抑制效应。本研究中实验 1 同样发现了注意抑制效应的变化，这也体现了对颜色独子的抑制并不是自动发生的，而是受到自上而下的注意调节的，被试逐渐习得抑制颜色独子以提高搜索效率。在实验 1 的基础之上，实验 2 发现任务刚开始的试次中低概率颜色独子不能被很好的抑制，但其显著性也不足以产生显著的注意捕获效应，可能是由于低概率颜色的突显性带来的捕获和被试对其自上而下的抑制存在一定程度的抵消，而随着任务的继续被试逐渐习得了对低概率颜色独子的抑制。与实验 1 中颜色独子在任务开始时不能被很好的抑制不同，在实验 2 中高概率颜色独子则可以很快的就被抑制，这也说明了基于干扰物特征的统计规则会影响注意抑制效应。高概率颜色独子可以快速的被抑制，且随着任务继续抑制量进一步增大，有一种可能是任务开始之后其呈现频率的增加会降低偶然呈现带来的显著性增加，故被试在实验开始后很快就能够有效地抑制对其的加工。

然而，本研究也存在一定的局限性。首先，本研究主要关注的是基于颜色独子的统计规则，对于其他类型的突显刺激并没有考察(如突现刺激、情绪刺激、语义刺激等)。有研究显示突现刺激对注意的影响与颜色独子不同(Franconeri & Simon, 2003; Jonides & Yantis, 1984)，而情绪刺激和语义刺激除了物理属性还包含社会意义(王慧媛 等, 2018)，未来可能需要的研究考察基于突现刺激和情绪刺激等不同类型刺激的统计规则对注意的影响；其次，本研究中颜色独子的不同特征亮度相同，不能考察颜色独子特征的统计规则和突显性之间的交互作用。而有研究发现高突显性颜色独子呈现在高概率独子位置时，相较于低突显性颜色独子呈现在高概率独子位置注意捕获量更小(Failing & Theeuwes, 2019)，未来需要更多的研究设置多个颜色独子的突显性梯度，考察颜色独子特征的统计规则和突显性之间的交互作用。

5 结论

(1) 排除刺激大小带来的影响后，呈现颜色独子条件下被试的反应时显著增快，说明额外单例范式中当被试采取特征探测策略时，注意抑制效应依然稳定存在；

(2) 操控基于干扰物特征的统计规则，高概率颜色独子条件下被试的反应显著快于低概率颜色独子和无独子条件，说明注意抑制效应确实会受到基于干扰物特征的统计规则的影响。

参考文献

Awh, E., Belopolsky, A. V., & Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(8), 437–443.

Burnham, B. R., Harris, A. M., & Suda, M. T. (2011). Relationship between WMC and contingent involuntary orienting. *Visual Cognition, 19*(8), 983–1002.

Chun, M. M., & Jiang, Y. (1999). Top-down attentional guidance based on implicit learning of visual covariation. *Psychological Science, 10*(4), 360–365.

Eimer, M., & Kiss, M. (2008). Involuntary attentional capture is determined by task set: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(8), 1423–1433.

Failing, M., & Theeuwes, J. (2019). More capture, more suppression: Distractor suppression due to statistical regularities is determined by the magnitude of attentional capture. *Psychonomic Bulletin & Review, 27*(1), 86–95.

Failing, M., Wang, B., & Theeuwes, J. (2019). Spatial suppression due to statistical regularities is driven by distractor suppression not by target activation. *Attention, Perception, & Psychophysics, 81*(5), 1405–1414.

Ferrante, O., Patacca, A., Di Caro, V., Della Libera, C., Santandrea, E., & Chelazzi, L. (2018). Altering spatial priority maps via statistical learning of target selection and distractor filtering. *Cortex, 102*, 67–95.

Folk, C. L., Remington, R. W. , & Johnston, J. C. (1992). Involuntary covert orienting is contingent on attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 18*(4), 1030–1044.

Franconeri, S. L., & Simons, D. J. (2003). Moving and looming stimuli capture attention. *Perception & Psychophysics, 65*(7), 999–1010.

Fukuda, K., & Vogel, E. K. (2011). Individual differences in recovery time from attentional capture. *Psychological Science, 22*(3), 361–368.

Gaspar, J. M., & McDonald, J. J. (2014). Suppression of salient objects prevents distraction in visual search. *Journal of Neuroscience, 34*(16), 5658–5666.

Gaspelin, N., Leonard, C. J., & Luck, S. J. (2015). Direct evidence for active suppression of salient-but-irrelevant sensory inputs. *Psychological Science, 26*(11), 1740–1750.

Gaspelin, N., Leonard, C. J., & Luck, S. J. (2017). Suppression of overt attentional capture by salient-but-irrelevant color singletons. *Attention, Perception, & Psychophysics, 79*(1), 45–62.

Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018a). Combined electrophysiological and behavioral evidence for the suppression of salient distractors. *Journal of Cognitive Neuroscience, 30*(9), 1265–1280.

Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018b). The role of inhibition in avoiding distraction by salient stimuli. *Trends in Cognitive Sciences, 22*(1), 79–92.

Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018c). Distinguishing among potential mechanisms of singleton suppression. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 44*(4), 626–644.

Gaspelin, N., Gaspar, J. M., & Luck, S. J. (2019). Oculomotor inhibition of salient distractors: Voluntary inhibition cannot override selection history. *Visual Cognition, 27*(3–4), 227–246.

Geng, J. J. & Behrmann, M. (2005). Spatial probability as an attentional cue in visual search. *Perception & Psychophysics, 67*(7), 1252–1268

Gong, M., Li, S., & Yang, F. (2016). Reward association facilitates distractor suppression in human visual search. *The European Journal of Neuroscience, 43*(7), 942–953.

Gong, M., Jia, K., & Li, S. (2017). Perceptual competition promotes suppression of reward salience in behavioral selection and neural representation. *Journal of Neuroscience, 37*(26), 6242–6252.

Gong, M., Jia, K., & Li, S. (2018). Reward learning drives modulation on visual attention. *Chinese Journal of Applied Psychology, 24*(2), 99–112.

[龚梦园, 贾珂, 李晟. (2018). 奖赏学习对视觉注意的调控. *应用心理学*, *24*(2), 99–112.]

Gong, M., & Liu, T. (2020). Biased neural representation of feature-based attention in the human frontoparietal network. *Journal of Neuroscience, 40*(43), 8386 - 8395.

Han, S. W. , & Kim, M. S. (2009). Do the contents of working memory capture attention? Yes, but cognitive control matters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 35*(5), 1292–1302.

Harris, A. M., Jacoby O., Remington R. W., Becker S. I., Mattingley J. B. (2020). Behavioral and electrophysiological evidence for a dissociation between working memory capacity and feature-based attention. *Cortex, 129*, 159–174.

Hu, L., Ding, Y., & Qu, Z. (2019). Perceptual learning induces active suppression of physically nonsalient shapes. *Psychophysiology, 56*(9), e13393.

Jannati, A., Gaspar, J. M., & McDonald, J. J. (2013). Tracking target and distractor processing in fixed-feature visual search: Evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 39*(6), 1713–1730.

Jiang, J., Summerfield, C., & Egner, T. (2013). Attention sharpens the distinction between expected and unexpected percepts in the visual brain. *Journal of Neuroscience, 33*(47), 18438–18447.

Kumada, T. (2001). Feature-based control of attention: evidence for two forms of dimension weighting. *Perception & Psychophysic*s, 63(4), 698–708.

Lee, J., Leonard, C. J., Luck, S. J., & Geng, J. J. (2018). Dynamics of feature-based attentional selection during color-shape conjunction search. *Journal of Cognitive Neuroscience, 30*(12), 1773–1787.

Louisa, K.(2017). The effect of stimulus size and eccentricity on attention shift latencies. *Vision, 1*(4), 25–34.

Maunsell, J. H. R., & Treue, S. (2006). Feature-based attention in visual cortex. *Trends in Neurosciences, 29*(6), 317–322.

Nissens, T. , Failing, M. , & Theeuwes, J. (2017). People look at the object they fear: Oculomotor capture by stimuli that signal threat. *Cognition and Emotion, 31*(8), 1707–1714.

Ono, F., & Kawahara, J. I.(2007). The subjective size of visual stimuli affects the perceived duration of their presentation. *Perception & Psychophysics, 69*(6), 952–957.

Pronina A. S., Grigoryan R.K., & Kaplan A.Ya.(2018). Objective eye movements during typing in P300 BCI: The effect of stimuli size and spacing. *Moscow University Psychology Bulletin, 4*, 120–134.

Sàenz, M., Buraĉas, G. T., & Boynton, G. M. (2002). Global effects of feature-based attention in human visual cortex. *Nature Neuroscience, 5*(7), 631–632.

Sàenz, M., Buracâs, G. T., Boynton, G. M. (2003). Global feature-based attention for motion and color. *Vision Research, 43*, 629–637

Sawaki, R., & Luck, S. J. (2010). Capture versus suppression of attention by salient singletons: Electrophysiological evidence for an automatic attend-to-me signal. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(6), 1455–1470.

Sawaki, R., & Luck, S. J. (2011). Active suppression of distractors that match the contents of visual working memory. *Visual Cognition, 19*(7), 956–972.

Sawaki, R., Geng, J. J., & Luck, S. J. (2012). A common neural mechanism for preventing and terminating the allocation of attention. *Journal of Neuroscience, 32*(31), 10725–10736.

Sawaki, R., & Luck, S. J. (2013). Active suppression after involuntary capture of attention. *Psychonomic Bulletin & Review, 20*(2), 296–301.

Stilwell, B. T., Bahle, B., & Vecera, S. P. (2019). Feature-based statistical regularities of distractors modulate attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 45*(3), 419–433.

Sun, M., Wang, E., Huang, J., Zhao, C., Guo, J., Li, D., . . . Song, Y. (2018). Attentional selection and suppression in children and adults. *Development Science, 21*(6), e12684.

Vatterott, D. B., & Vecera, S. P. (2012). Experience-dependent attentional tuning of distractor rejection. *Psychonomic Bulletin & Review, 19*(5), 871–878.

Vatterott, D. B., Mozer, M. C., & Vecera, S. P.(2017). Rejecting salient distractors: Generalization from experience. *Attention, Perception, & Psychophysics, 80*, 485–499.

Wang, B. & Theeuwes, J. (2018a). Statistical regularities modulate attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performanc*e, 44(1), 13–17.

Wang, B., & Theeuwes, J. (2018b). How to inhibit a distractor location? Statistical learning versus active, top-down suppression. *Attention, Perception, & Psychophysics, 80*(4), 860–870.

Wang, B., & Theeuwes, J. (2018c). Statistical regularities modulate attentional capture independent of search strategy. *Attention, Perception, & Psychophysics, 80*(7), 1763–1774.

Wang, B., Samara, I., & Theeuwes, J. (2019). Statistical regularities bias overt attention. *Attention, Perception, & Psychophysics, 81*, 1813–1821.

Wang H. Y., Sui, J., & Zhang M. (2018). Attentional capture is contingent on attentional control setting for semantic meaning: Evidence from modified spatial cueing paradigm. *Acta Psychologica Sinica, 50*(10), 1071–1082.

[王慧媛, 隋洁, 张明. (2018). 语义关联的注意捕获——来自线索化范式的证据. *心理学报, 50*(10), 1071–1082.]

Yantis, S., & Jonides, J. (1984). Abrupt visual onsets and selective attention: evidence from visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16*(1), 121–134.

Yantis, S., & Hillstrom, A. P. (1994). Stimulus-driven attentional capture: Evidence from equiluminant visual objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20*(1), 95–107.

Zhao, J., & Luo, Y. (2017). Statistical regularities guide the spatial scale of attention. *Attention, Perception, & Psychophysics, 79*(1), 24–30.

The influence of feature-based statistical regularity of singletons on the attentional suppression effect

ZHANG Fan; WANG Aijun; ZHANG Ming

(*Department of Psychology, Research Center for Psychology and Behavioral Sciences, Soochow University, Suzhou, 215123, China*)

Abstract

Statistical regularity refers to the regular presentation of stimuli implicit in a task. Previous studies have shown that statistical regularity based on location can affect the judgement of subsequent stimuli presented at that location. The effect of attentional capture would decrease when the distractor frequently appears in a certain location. However, comprehensive studies on whether statistical regularity based on features can modulate attention are lacking. The current study adopted a variant of the additional singleton paradigm to investigate the influence of feature-based statistical regularity of singletons on the attentional suppression effect.

Experiment 1 was a single-factor within-subject design, and the presentation of a colour singleton was manipulated (colour singleton absent vs. colour singleton present) to investigate the attentional suppression effect. During the task, the participants adopted a feature search strategy to search for a target of a specific shape (diamond or circle) and ignored the salient colour singleton. In half of the trials, all stimuli were the same colour (green or red); in the other half of the trials, one colour singleton was presented among the search sequences. Similar to experiment 1, experiment 2 was a single-factor within-subject design, but the statistical regularity of the singleton features was manipulated (colour singleton absent vs. low probability colour singleton present vs. high probability colour singleton present). In one-third of the trials, all stimuli were the same colour (colour singleton absent). In the trials in which a colour singleton was presented, the colour singleton frequently appeared in a specific colour (50%, called high probability colour); in the other half of the singleton-present trials, a colour singleton appeared in one of the three colours randomly (called low probability colour). The participants were asked to respond by pressing the keyboard as quickly and accurately as possible in both experiment 1 and experiment 2.

Based on the reaction times, the results showed that (1) in experiment 1, when the participants were forced to adopt the feature search strategy, they responded significantly faster in the colour singleton-present trials than in the colour singleton-absent trials; (2) in experiment 2, regardless of whether there was a high or low probability colour condition, the participants responded significantly faster when the colour singleton was present than when it was absent; (3) compared with the low probability colour condition, the high probability colour condition corresponded to significantly faster responses.

These results suggest that the influence of statistical regularity on attention is not confined to location, and feature-based statistical regularity of singletons can also modulate the attentional suppression effect.

Keywords additional singleton paradigm, feature search strategy, statistical regularities, attentional suppression effect